

# 应用于 RDTS 系统的全光纤脉冲激光器

吴涛<sup>1,2</sup>, 庞涛<sup>1\*</sup>, 汤玉泉<sup>1,3</sup>, 杨爽<sup>1</sup>, 史博<sup>1,2</sup>, 李俊<sup>1</sup>, 张志荣<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院合肥物质科学研究院, 安徽光学精密机械研究所, 光子器件与材料安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230031;

<sup>2</sup>中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;

<sup>3</sup>电子元器件可靠性物理及其应用技术重点实验室, 广东 广州 510610

**摘要** 为了满足分布式光纤拉曼温度传感(RDTS)器对前级光源的需求,采用主振荡功率放大(MOPA)技术,研制了一台中心波长为 1550 nm 的全光纤脉冲激光器。激光器的光纤放大器分为两级结构,采用前向抽运方式。光纤脉冲激光器的输出峰值功率在 0~10 W 范围内可调,线宽为 0.32 nm,信噪比大于 25 dB,且输出光脉冲的脉宽、频率均可调节。使用自制的光纤激光器进行 2 km 基于拉曼散射的光纤分布式测温实验,解调的温度信号具有不大于 ±1 °C 的测量精度,并且测温周期最短可达 1.31 s,满足实际运用需求。

**关键词** 激光器;全光纤脉冲激光器;主振荡功率放大;光纤放大器;光纤拉曼温度传感器

中图分类号 TN248.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1101009

## Application of MOPA All-Fiber Pulsed Laser in RDTS System

Wu Tao<sup>1,2</sup>, Pang Tao<sup>1\*</sup>, Tang Yuquan<sup>1,3</sup>, Yang Shuang<sup>1</sup>,  
Shi Bo<sup>1,2</sup>, Li Jun<sup>1</sup>, Zhang Zhirong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Anhui Provincial Key Laboratory of Photonics Devices and Materials, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

<sup>2</sup>University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

<sup>3</sup>Reliability Physics and Application Technology of Electronic Component Laboratory, Shenzhen, Guangdong 510610, China

**Abstract** To meet the pre-stage light source requirement for a distributed fiber Raman temperature sensor (RDTS), an all-fiber pulsed laser with a central wavelength of 1550 nm is developed based on the main oscillator power amplification (MOPA) technology. The laser's fiber amplifier is a two-stage structure with a forward pumping mode. The fiber pulse laser has a peak power output in the adjustable range of 0-10 W, linewidth of 0.32 nm, signal-to-noise ratio of above 25 dB, and adjustable output pulse width and frequency. An experimental temperature measurement is conducted based on Raman scattering for 2 km using a self-made fiber laser. Measurement results show that the temperature demodulation accuracy is less than ±1 °C, and the shortest temperature measurement period reaches 1.31 s. Experimental results prove that the self-made fiber laser satisfies the requirements of actual applications.

**Key words** lasers; all-fiber pulsed laser; main oscillation power amplification; fiber optic amplifier; fiber Raman temperature sensor

**OCIS codes** 060.2370;140.3510;140.3070

## 1 引言

自从 20 世纪 80 年代中期英国开发出分布式光

纤测温传感(RDTS)器以来,该项技术在世界上受到广泛关注<sup>[1]</sup>。分布式光纤测温技术弥补了感温探测器的不足,它不仅可以实现对温度的实时监测,而

收稿日期: 2019-05-15; 修回日期: 2019-07-11; 录用日期: 2019-07-22

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0805004)、中国科学院科技网络服务计划(KFJ-ST5-SCYD-123)、电子元器件可靠性物理及其应用技术重点实验室开放基金课题资助(ZHD201706)

\* E-mail: bumianren1982@aiofm.ac.cn

且可以实现对异常温度及温升速率的预警和准确定位。此外,分布式光纤测温系统具有结构简单、适用于长距离温度监测、不受电磁干扰等优点,目前已被广泛应用于大型建筑、交通运输、隧道、堤坝、电力工程、化工石油等领域<sup>[2-5]</sup>。在基于拉曼散射的分布式光纤测温传感系统中,光源参数对测温精度、测温的传感距离、空间分辨率以及信噪比等具有重要影响。由于光纤激光器具有小型模块化、可靠性高、寿命长、使用灵活及维护方便等特点<sup>[6-8]</sup>,RDTs系统多使用光纤激光器作为前级光源。本文设计了一台满足RDTs系统使用需求的主振荡功率放大(MOPA)全光纤激光器,并从理论分析、模拟仿真以及实验优化三个方面给出了应用于RDTs系统的光纤激光器的设计方法及优化依据。

## 2 光纤激光器设计要求分析

RDTs系统根据拉曼散射对温度的敏感性,通过对反斯托克斯拉曼散射信号和斯托克斯拉曼散射信号的比值进行解调。将RDTs与光时域反射(OTDR)技术相结合,可以得到沿光纤的温度场分布,光纤分布式测温结构如图1所示。脉冲光通过波分复用器(WDM)进入传感光纤,在光纤传播过程中会产生反向传播的斯托克斯光和反斯托克斯光。两种反向散射光信号通过波分复用器分束后,由雪崩光电二极管(APD)探测电路进行光电转换,再通过采集卡(DAQ)将采集到的信号传送到上位机,进行解调后即可得到沿光纤分布的温度信号。

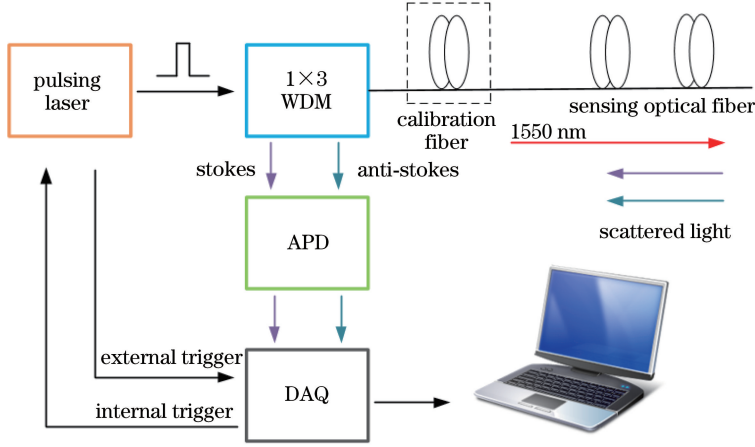


图1 光纤分布式测温原理图

Fig. 1 Schematic of temperature measurement with distributed fiber optic

光纤 $l$ 处局域的斯托克斯拉曼散射光通量和反斯托克斯拉曼散射光通量可表示为<sup>[9]</sup>

$$\Phi_{ST} = K_{ST} \cdot S \cdot \nu_{ST}^4 \cdot \Phi_e \cdot \exp[-(\alpha_0 + \alpha_{ST}) \cdot l] \cdot R_{ST}(T), \quad (1)$$

$$\Phi_{AS} = K_{AS} \cdot S \cdot \nu_{AS}^4 \cdot \Phi_e \cdot \exp[-(\alpha_0 + \alpha_{AS}) \cdot l] \cdot R_{AS}(T), \quad (2)$$

式中: $K_{ST}$ 、 $K_{AS}$ 分别为与斯托克斯、反斯托克斯拉曼散射截面有关的系数; $\nu_{ST}$ 、 $\nu_{AS}$ 分别为斯托克斯和反斯托克斯拉曼散射光子频率; $\Phi_e$ 为入射到光纤的激光光子通量; $S$ 为光纤的背向散射因子; $\alpha_0$ 、 $\alpha_{ST}$ 以及 $\alpha_{AS}$ 分别为入射光、斯托克斯拉曼散射光以及反斯托克斯拉曼散射光在光纤中的损耗系数; $l$ 为光纤长度; $R_{ST}(T)$ 、 $R_{AS}(T)$ 为与光纤分子低能级和高能级上布居数有关的系数,与光纤局域处的温度 $T$ 有关。

$$R_{ST}(T) = \frac{1}{1 - \exp[-(h \cdot \Delta\nu)/(k_B \cdot T)]}, \quad (3)$$

$$R_{AS}(T) = \frac{1}{\exp[(h \cdot \Delta\nu)/(k_B \cdot T)] - 1}. \quad (4)$$

采用斯托克斯信号解调反斯托克斯信号,计算公式为

$$\frac{\Phi_{AS}(T_l)}{\Phi_{ST}(T_l)} = \frac{K_{AS}}{K_{ST}} \cdot \frac{\nu_{AS}^4}{\nu_{ST}^4} \cdot \exp\left(-\frac{h \cdot \Delta\nu}{k_B \cdot T_l}\right) \cdot \exp[(\alpha_{ST} - \alpha_{AS}) \cdot l], \quad (5)$$

式中: $T_l$ 为待测温度; $h$ 为普朗克常量; $\Delta\nu$ 为光纤分子的振动频率; $k_B$ 为玻尔兹曼常数。对(5)式等号两边分别取对数,可得

$$\ln \frac{\Phi_{AS}(T_l)}{\Phi_{ST}(T_l)} = \ln\left(\frac{K_{AS}}{K_{ST}} \cdot \frac{\nu_{AS}^4}{\nu_{ST}^4}\right) + \left(-\frac{h \cdot \Delta\nu}{k_B \cdot T_l}\right) + (\alpha_{ST} - \alpha_{AS}) \cdot l. \quad (6)$$

将被测光纤 $l_0$ 处的一部分放置在温度为 $T_{l_0}$ 的环境中,可得

$$\ln \frac{\Phi_{AS}(T_{l_0})}{\Phi_{ST}(T_{l_0})} = \ln \left( \frac{K_{AS}}{K_{ST}} \cdot \frac{v_{AS}^4}{v_{ST}^4} \right) + \left( -\frac{h \cdot \Delta\nu}{k_B \cdot T_{l_0}} \right) + (\alpha_{ST} - \alpha_{AS}) \cdot l_0. \quad (7)$$

联立(6)式和(7)式,可得

$$\frac{1}{T_l} - \frac{1}{T_{l_0}} = \frac{k_B}{h \cdot \Delta\nu} \cdot$$

$$\ln \frac{\Phi_{AS}(T_{l_0}) \cdot \Phi_{ST}(T_l)}{\Phi_{AS}(T_l) \cdot \Phi_{ST}(T_{l_0})} + (\alpha_{ST} - \alpha_{AS}) \cdot (l - l_0). \quad (8)$$

由(8)式化简可得

$$T_l = \left[ \frac{k_B}{h \cdot \Delta\nu} \cdot \ln \frac{\Phi_{AS}(T_{l_0}) \cdot \Phi_{ST}(T_l)}{\Phi_{AS}(T_l) \cdot \Phi_{ST}(T_{l_0})} + (\alpha_{ST} - \alpha_{AS}) \cdot (l - l_0) + \frac{1}{T_{l_0}} \right]^{-1} = \left[ \frac{k_B}{h \cdot \Delta\nu} \cdot \ln \frac{P_{AS}(T_{l_0}) \cdot P_{ST}(T_l)}{P_{AS}(T_l) \cdot P_{ST}(T_{l_0})} + (\alpha_{ST} - \alpha_{AS}) \cdot (l - l_0) + \frac{1}{T_{l_0}} \right]^{-1}. \quad (9)$$

式中: $P_{AS}(T_{l_0})$ 、 $P_{ST}(T_{l_0})$ 分别为被测光纤 $l_0$ 处的反斯托克斯拉曼散射光强和斯托克斯拉曼散射光强; $P_{AS}(T_l)$ 、 $P_{ST}(T_l)$ 分别为被测光纤 $l$ 处的反斯托克斯拉曼散射光强和斯托克斯拉曼散射光强。通过(9)式可得到沿光纤分布的温度场,RDTS系统测温精度以及测温距离与系统的信噪比直接相关,激光器的脉冲功率越大,系统信噪比越高,传感距离越长,但当脉冲功率大于某一阈值时,光线中会产生非线性效应。因此,所设计的光纤激光器峰值功率大小需可调,以便于实现最佳功率输入。在增大测温距离与提高测温精度的同时,为防止在光纤中产生非线性效应,应使激光器的峰值功率在低于产生非线性效应阈值的前提下尽可能大,这对光纤激光器输出脉冲峰值功率的稳定性提出了更高的要求。受激布里渊散射(SBS)是光纤中最容易出现的非线性效应,其阈值很低,但随着光源线宽的增大而增大<sup>[10]</sup>。为了提高SBS的阈值,光纤激光器的线宽不能过窄,但如果线宽太宽,又会增加光纤色散效应,影响光纤分布式测温的测量,因此线宽也不宜太宽。在光纤传感中,激光器的波长越短,产生的斯托克斯散射光和反斯托克斯散射光强度会越强,但是波长越短,在光纤中的损耗也就越大,因此种子源选择短波长区域的光纤低损耗窗口在1550 nm波长的半导体激光器。又由于半导体激光器输出功率有限,因此采取MOPA技术使输出功率满足要求。对于

2 km及以上的RDTS分布式测温,在采集卡对采集的信号进行线性累加66535次平均之后,光脉冲的重复频率最高可设置为50 kHz,从而可实现最短周期为1.31 s的分布式测温。由于实验室使用的采集卡和自制APD探测电路带宽最高为100 MHz,因此当光脉冲的脉宽大于10 ns时,RDTS的空间分辨率由光脉冲的脉宽决定;当脉宽小于10 ns时,RDTS的空间分辨率由采集卡的AD转换时间和APD的响应度决定,即

$$\Delta z = \frac{c}{2 \cdot n} \cdot \max\{\tau_w, \tau_r, \tau_c\}, \quad (10)$$

式中: $\tau_w$ 为光脉冲宽度; $\tau_r$ 为探测器响应时间; $\tau_c$ 为采集卡的AD转换时间; $n$ 为光纤纤芯折射率; $c$ 为光在真空中传播的速度; $\Delta z$ 为空间分辨率。为了在已有条件下理论上获得最高的空间分辨率,即2 m的空间分辨率,光脉冲能实现最窄脉宽为10 ns的脉冲输出。一般应用场合下,可采用20~40 ns的脉宽,这样相对于10 ns脉宽的脉冲信号而言,脉冲能量相对更高,信噪比也就更大。

### 3 光路仿真与设计

#### 3.1 理论分析

在掺饵光纤(EDF)中,由于抽运光的激励作用, $\text{Er}^{3+}$ 会跃迁到高能级,从而形成粒子数反转,当信号光馈入掺饵光纤后, $\text{Er}^{3+}$ 在信号光的作用下发生受激辐射,即高能级的粒子跃迁到低能级,产生频率、方向、相位以及偏振态与信号光完全相同的光子,从而实现信号光的放大。而上能级粒子自发地从高能级跃迁到低能级的过程中产生频率、方向、相位以及偏振态都不确定的光子,这个过程被称为自发辐射。自发辐射也是放大过程中噪声的主要来源之一。抽运光有980 nm以及1480 nm两种波长,1480 nm抽运是一个近似的二能级模型,980 nm抽运是一个标准的三能级模型,但由于 $\text{Er}^{3+}$ 在第三能级上的寿命远小于在二能级上的寿命,因此可以近似为二能级模型。可建立掺饵光纤放大器(EDFA)在稳态情况下的传输方程<sup>[11]</sup>,根据文献[11]的(20)式,在光纤放大器 $z$ 处的光束功率为

$$\frac{dP_k(z)}{dz} = u_k \cdot (\alpha_k + g_k^*) \cdot \frac{\bar{n}_2}{\bar{n}_1} \cdot P_k(z) + u_k \cdot g_k^* \cdot \frac{\bar{n}_2}{\bar{n}_1} \cdot m \cdot h \cdot v_k \cdot \Delta\nu_k - u_k \cdot (\alpha_k + l_k) \cdot P_k(z), \quad (11)$$

式中:  $P_k(z)$  为光纤放大器中  $z$  位置处的光束功率;  $\alpha_k$ 、 $g_k^*$  和  $l_k$  分别为掺铒光纤在第  $k$  个光模式下的吸收系数、增益系数和本征损耗 ( $k=1, 2, \dots, N$ ), 其中,  $k$  表示频率间隔数,  $N$  表示总共分为  $N$  个频率间隔;  $m$  表示光纤中两个正交的偏振模, 一般取 2;  $h$  为普朗克常量, 为  $6.62607 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ ;  $\nu_k$  为光频;  $u_k$  表示光在光纤中传输方向的系数。对于放大器中的前向传输光,  $u_k$  取 +1, 对于后向传输光,  $u_k$  取 -1。根据(11)式可得, 前向和后向放大自发辐射 (ASE) 功率为

$$\begin{aligned} \frac{dP_{\text{ASE}}^{\pm}(z)}{dz} &= \pm(\alpha_k + g_k^*) \cdot \\ &\frac{\bar{n}_2}{n_1} \cdot P_{\text{ASE}}^{\pm}(z) \mp (\alpha_k + l_k) \cdot \\ &P_{\text{ASE}}^{\pm}(z) \pm g_k^* \cdot \frac{\bar{n}_2}{n_1} \cdot m \cdot h \cdot \nu_k \cdot \Delta\nu_k, \end{aligned} \quad (12)$$

式中:  $P_{\text{ASE}}^{\pm}(z)$  为前向 ASE 和后向 ASE 在光纤放大器  $z$  处的功率; ASE 谱分为  $N$  个频率间隔 ( $\nu_j, \dots, \nu_{j+\Delta\nu_j}$ ),  $j=1, 2, \dots, N$ ;  $\Delta\nu_k$  为自发辐射噪声等效带宽;  $m h \nu_k \Delta\nu_k$  为  $n_2$  粒子产生的自发辐射的贡献。对于窄线光束的信号光和抽运光, 频带宽度  $\Delta\nu=0$ , 因此, 根据(11)式可得

$$\begin{aligned} \frac{dP_s(z)}{dz} &= (\alpha_s + g_s^*) \cdot \\ &\frac{\bar{n}_2}{n_1} \cdot P_s(z) - (\alpha_s + l_s) \cdot P_s(z), \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \frac{dP_p(z)}{dz} &= (\alpha_p + g_p^*) \cdot \\ &\frac{\bar{n}_2}{n_1} \cdot P_p(z) - (\alpha_p + l_p) \cdot P_p(z). \end{aligned} \quad (14)$$

式中:  $P_s(z)$ 、 $P_p(z)$  分别为信号光、抽运光在光纤放大器  $z$  处的功率;  $\alpha_s$ 、 $g_s^*$  和  $l_s$  为掺铒光纤对信号光的吸收系数、增益系数和本征损耗;  $\alpha_p$ 、 $g_p^*$  和  $l_p$  为掺铒光纤对抽运光的吸收系数、增益系数和本征损耗, 本征损耗的值通常很小 ( $l \leq 0.01 \text{ dB/m}$ ,  $l \ll \alpha$ )。上能级平均粒子数  $\bar{n}_2$  与基态和上能级总平均粒子数  $\bar{n}_1$  的比值为

$$\begin{aligned} \frac{\bar{n}_2}{\bar{n}_1} &= \sum_k \frac{P_k^{\pm}(z) \cdot \alpha_k \cdot \tau}{\pi \cdot b_{\text{eff}}^2 \cdot \bar{n}_1 \cdot h \cdot \nu_k} / \\ &\left[ 1 + \sum_k \frac{P_k^{\pm}(z) \cdot (\alpha_k + g_k^*) \cdot \tau}{\pi \cdot b_{\text{eff}}^2 \cdot \bar{n}_1 \cdot h \cdot \nu_k} \right], \end{aligned} \quad (15)$$

式中:  $b_{\text{eff}}^2$  为等效掺杂半径;  $\tau$  为上能级  $\text{Er}^{3+}$  的寿命。对于在 EDF 中传输的光功率, 可以采用四阶龙格-库塔法进行迭代求解, 也可通过 Optisystem 软件进

行模拟仿真, 为信号光功率放大的光路结构参数设计提供参考。在全增益恢复且只考虑单脉冲的情况下, 假设脉宽足够短, 引入基模损耗系数, 脉冲能量方程为

$$\begin{aligned} E_{\text{ext}} &= h \cdot \nu_s \cdot A \cdot \\ &\left[ \int_0^l n_2(z) dz - n_0 \cdot l \cdot \frac{\sigma_{\text{as}}}{\sigma_{\text{as}} + \sigma_{\text{es}}} \right], \end{aligned} \quad (16)$$

式中:  $\sigma_{\text{as}}$ 、 $\sigma_{\text{es}}$  分别为信号光的吸收截面和发射截面;  $\nu_s$  为信号光频率;  $A$  为掺杂面积;  $n_2(z)$  为  $z$  处激发态粒子数浓度;  $n_0$  为基态和上能级粒子数之和;  $l$  为掺铒光纤长度。

### 3.2 光路仿真分析以及设计

掺铒光纤放大器有 3 种抽运方式: 前向抽运、后向抽运以及双向抽运, 结构示意图如图 2 所示。

前向抽运噪声最低, 增益也最小; 后向抽运增益最大, 噪声也最大; 双向抽运增益与后向抽运相近, 噪声处于前向抽运和后向抽运之间<sup>[12]</sup>。在增益倍数满足要求的前提下, 为了减小噪声, 选用前向抽运方式。980 nm 抽运具有增益高、噪声低的特点, 而 1480 nm 抽运虽然可获得较高的输出功率, 但噪声较大<sup>[13]</sup>, 因此选用 980 nm 抽运方式。当入射光功率较大时, 增益系数会相对较小, 噪声系数也会减小, 这是因为较大的入射光功率会消耗更多的反转粒子, 从而抑制了 ASE 噪声放大, 同时也削弱了反转粒子的自发辐射现象, 因此, 应尽量提高种子源激光器的输出光功率。首先采用 Optisystem 仿真软件对掺铒光纤放大器进行仿真, 观察在其他参数固定时, 不同浓度下放大器输出功率与抽运功率的关系, 重要的仿真参数如表 1 所示。(L) 表示低浓度掺铒光纤仿真参数, 以 fiber core 公司的 I-4(980/125)HC 为例; (H) 代表高浓度掺铒光纤仿真参数, 以 I-12(980/125) 为例; EDF1 代表第一级掺铒光纤, EDF2 代表第二级掺铒光纤。仿真结果如图 3 所示。

根据仿真结果可知, 抽运功率从 0 上升至 350 mW 的过程中, 高浓度掺铒光纤的输出功率与抽运功率呈线性正相关, 低浓度掺铒光纤的输出功率先是随着抽运功率的增加而快速增加, 当低能级粒子数急剧减少, 趋向于粒子反转饱和状态时, 输出功率的上升速度减缓。在阶跃折射率多模光纤中, 受激布里渊散射的阈值为 1~2 W, 并且随着光纤长度的增加而有所下降, 然后趋于恒定<sup>[14]</sup>。采用 2 km 的康宁 62.5  $\mu\text{m}/125 \mu\text{m}$  多模光纤进行分布式测温。首先对其进行阈值测试, 在考虑光纤连接损耗



的情况下,当光纤激光器输出峰值功率达到1.85 W时,开始产生非线性效应,因此当所要求的增益不是

过大时,选择 Fiber Core 公司低掺浓度的 I-4 系列掺铒光纤即可。

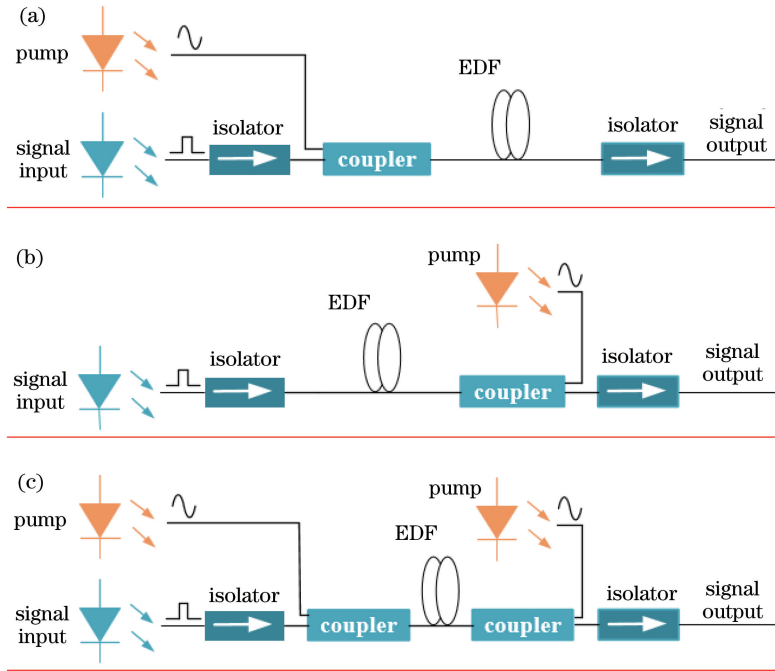


图 2 三种抽运方式示意图。(a)前向抽运;(b)后向抽运;(c)双向抽运

Fig. 2 Diagram of three pumping modes. (a) Forward pumping; (b) backward pumping; (c) double-way pumping

表 1 重要的仿真参数

Table 1 Important parameters for simulation

Parameter	Value	Parameter	Value
Insertion loss of isolator /dB	0.65	The length of EDF2 /m	10.8
Isolation of isolator /dB	43.62	(L)Core radius of EDF / $\mu\text{m}$	2.2
Return loss of isolator /dB	65.9	(L)Er doping radius of EDF / $\mu\text{m}$	2.2
Central wavelength of filter /nm	1550.12	(L)Numerical aperture of EDF	0.24
Bandwidth of filter /nm	0.6	(L)Er ion density of EDF / $\text{m}^{-3}$	$4.6 \times 10^{24}$
Transmission isolation of filter /dB	30	(H)Core radius of EDF / $\mu\text{m}$	2.3
Insertion loss of filter /dB	0.62	(H)Er doping radius of EDF / $\mu\text{m}$	2.3
Er metastable lifetime /ms	10	(H)Numerical aperture of EDF	0.23
The length of EDF1 /m	3.7	(H)Er ion density of EDF / $\text{m}^{-3}$	$10 \times 10^{24}$

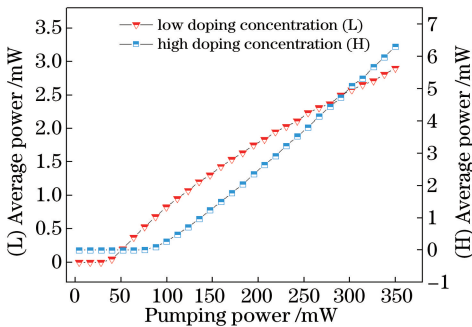


图 3 在使用不同掺杂浓度的掺铒光纤下输出功率随着抽运功率的变化

Fig. 3 Relationship between output power and pumping power in erbium-doped fiber with different doping concentrations

对单级掺铒光纤放大器长度进行优化仿真,可得到当输入光平均功率一定时,在不同抽运功率的情况下,增益随掺铒光纤长度的变化趋势。仿真结果如图 4 所示。

当其他因素确定时,光纤放大器的增益系数随着掺铒光纤长度的增加而先增大再减小,这是因为当掺铒光纤长度小于最优长度时,掺铒光纤的长度越长,Er<sup>3+</sup>数量越多,产生的反转粒子数也就越多,增益系数不断增大;当掺铒光纤长度大于最优长度时,处在低能级上的粒子没有完全反转,会对信号光有消耗作用,导致增益系数降低。实际实验中采用两级 EDF 结构,并且中间用隔离器连接,这是因为

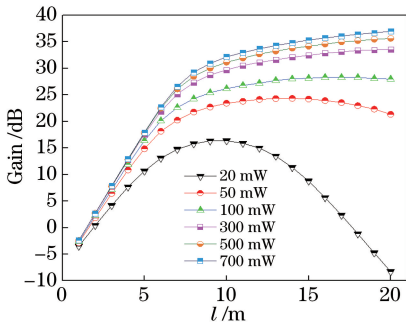


图 4 仿真得到的不同抽运功率下增益随光纤长度的变化

Fig. 4 Variation of gain with fiber length at different pumping powers obtained by simulation

反向 ASE 噪声会消耗光纤前端的反转粒子,从而降低抽运效率,加入隔离器后,噪声系数(NF)可得到

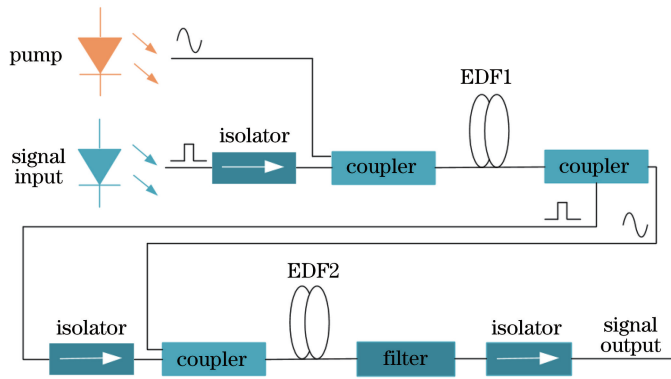


图 5 两级全光纤脉冲光放大结构

Fig. 5 Diagram of pulsed light amplification with two-stage all-fiber structure

## 4 实验分析

通过设置自制驱动电路的参数来调节激光器驱动电流的频率和占空比,从而调节激光器输出光脉冲的频率和脉宽,其中,频率在 0~50 kHz 范围内可调,脉宽在 0~200 ns 范围内可调。调节驱动电路参数使种子激光器产生重复频率为 10 kHz、脉宽为 30 ns 的光脉冲,其峰值功率为 5 mW,平均功率

较大改善<sup>[15]</sup>。第一段掺饵光纤长度与第二段掺饵光纤长度的比值在 0.25~0.4 之间,隔离器所起的作用最大,在抽运功率超过 40 mW 并且掺饵光纤长度相同的前提下,采用两级 EDF 结构并加入隔离器后的增益大于单级结构的增益<sup>[16]</sup>。考虑到实际中使用的光纤器件的差异性,以及熔接处损耗的不确定性,参考仿真结果结合实验进行进一步优化。最终,掺饵光纤的总长度选取 14.5 m,第一级掺饵光纤长度选取 3.7 m,第二级长度选取 10.8 m。为了进一步提高脉冲光放大系统的输出信噪比,在输出端加入一个滤波器,同时,为了防止反向传输光对种子激光器输出光的质量产生影响,在种子源激光器输出端加上隔离器。光路结构如图 5 所示。

为 1.5  $\mu$ W,脉冲能量为 0.15 nJ;脉冲信号通过耦合器进入功率放大器,抽运功率约为 377 mW 时,得到的输出峰值功率约为 5 W,平均功率为 1.5 mW,脉冲能量为 0.15  $\mu$ J;经过衰减器衰减后,采用自制 APD 探测电路分别对种子源输出和功率放大器输出的光时域信号进行测量,通过 Agilent DSO9404A 型号的示波器显示波形,如图 6 所示。可以看到,输出波形与输入波形几乎一致,无波形畸变现象。

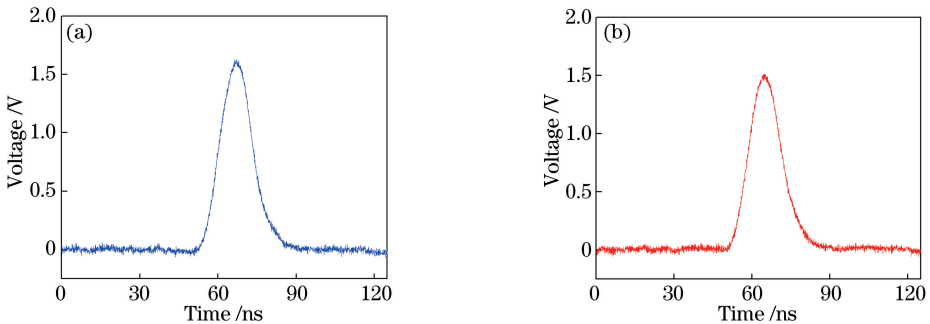


图 6 光信号时域波形。(a)种子源光信号;(b)放大后光信号

Fig. 6 Time domain waveforms of optical signal. (a) Optical signal from seed source; (b) amplified optical signal

对种子激光器的输出光脉冲峰值功率和抽运激光器的输出功率进行调节,使放大后的光脉冲峰值功率在 0~10 W 范围内可调,本研究中将种子激光器输出光脉冲峰值功率设置为 5 mW,重复频率以及脉宽固定时,改变抽运功率,采用 OPHIR VEGA 的光功率计对光纤激光器的输出平均功率进行测量。将所测量的平均功率转换为峰值功率,抽运功率与输出峰值功率的关系如图 7 所示。从图 7 可以看出:当抽运功率较低时,上能级粒子数较少,随着抽运功率的增加,输出功率上升速度较快;当抽运功率较大时,随着抽运功率的增大,反转粒子数增加趋向于饱和,因此输出光功率的上升速度减缓,这与仿真结果有较高的相关性。将实验结果与仿真结果进行对比,发现虽然两者的上升趋势具有较好的一致性,但在对应抽运功率下,实验结果偏小,这是因为在仿真时各参数的选择和实际值存在差异。根据 I-4(980/1550)HC 的技术手册可知,该款掺铒光纤对于 1531 nm 信号光的吸收系数为 7.7~9.4 dB/m,而实际中掺铒光纤的吸收系数与输入光功率的量级有关,因此所选择的吸收系数与实际使用的掺铒光纤的吸收系数会存在一定的偏差。根据吸收系数等相关参数进行仿真得到掺铒光纤掺杂浓度的过程中也会存在误差,并且使用的掺铒光纤中的  $\text{Er}^{3+}$  很难做到完全均匀的掺杂分布。因此,实际使用的掺铒光纤比仿真选择的吸收系数偏小、光纤掺杂不均匀或者仿真得出的掺铒光纤浓度偏大等,均会导致实际中光纤的放大能力弱于仿真得到的掺铒光纤的放大能力,故而测试结果比仿真结果偏小。实际中使用的 LC962UC74P-20R 型抽运激光器的输出尾纤为保偏尾纤,与单模光纤的熔接损耗相对较大,且光路中的光纤器件较多,若实际中光纤器件之间的熔接

损耗过大,也会导致测试结果小于仿真结果。若条件允许,可采用 1531 nm 窄线宽光源在特定输入功率下对所使用的掺铒光纤进行吸收系数测试,并对熔接损耗进行估算,这样可以减小掺铒光纤吸收系数的选取对实验结果与仿真结果差异性的影响。同时,可先进行熔接实验,再根据实验条件所能达到的熔接效果来选择仿真中各器件之间的熔接损耗,这样也可以减小仿真的估算误差。

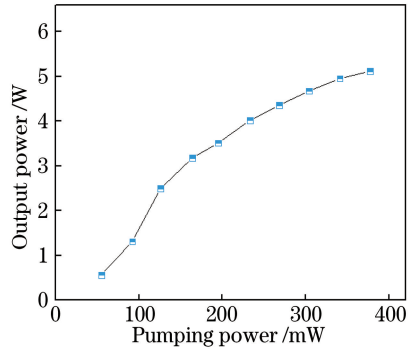


图 7 输出功率和抽运功率的关系  
Fig. 7 Relationship between output power and pumping power

采用 YOKOGAWA 公司分辨率为 0.02 nm 的 AQ6370D 型光谱仪对种子激光器输出以及光功率放大器输出光谱进行测量,测量之前需要采用可调衰减器对输出功率进行不同程度的衰减,光谱如图 8 所示。种子源脉冲输出线宽为 0.18 nm,半导体激光器以脉冲光的形式输出,其谐振腔的选模效果不及连续光输出腔的选模效果,因此线宽会相对于连续工作模式下宽一些。放大后线宽为 0.32 nm,这是由于光的边频放大作用,输出光线宽有一定的展宽。在输出端接滤波器,可有效抑制线宽的展宽。放大后输出光信噪比大于 25 dB,较好地满足了使用需求。

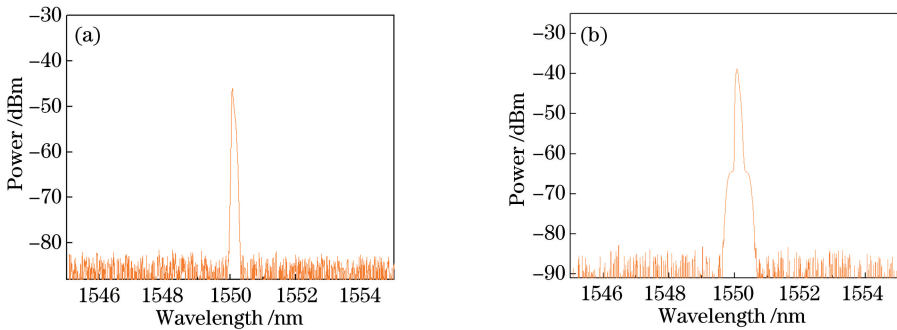


图 8 信号光谱。(a)种子源输出光谱;(b)放大光信号输出光谱

Fig. 8 Spectra of signal. (a) Output spectrum of seed source; (b) output spectrum of amplified optical signal

进行 2 km 基于拉曼散射的光纤分布式测温实验,前级光源为自制的全光纤激光器。采用天

津宏诺公司的 101-0S 型恒温箱模拟某段光纤所处环境的温度。分别对 45, 65, 85 °C 3 种温度进行

模拟,并采用 RDTs 进行温度测量。测量结果如图 9 所示,在光纤的 920~940 m 段温度出现变化,测温精度优于 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。恒温箱内的温度很难达到完全均匀,并且传感光纤具有保护套,盘在内部

的光纤和盘在外部的光纤可能存在较小的温度梯度,且光纤的分布参数在制作过程中也存在不均匀性。因此出现了图 9 所示的信号顶端温度的轻微不平坦现象。

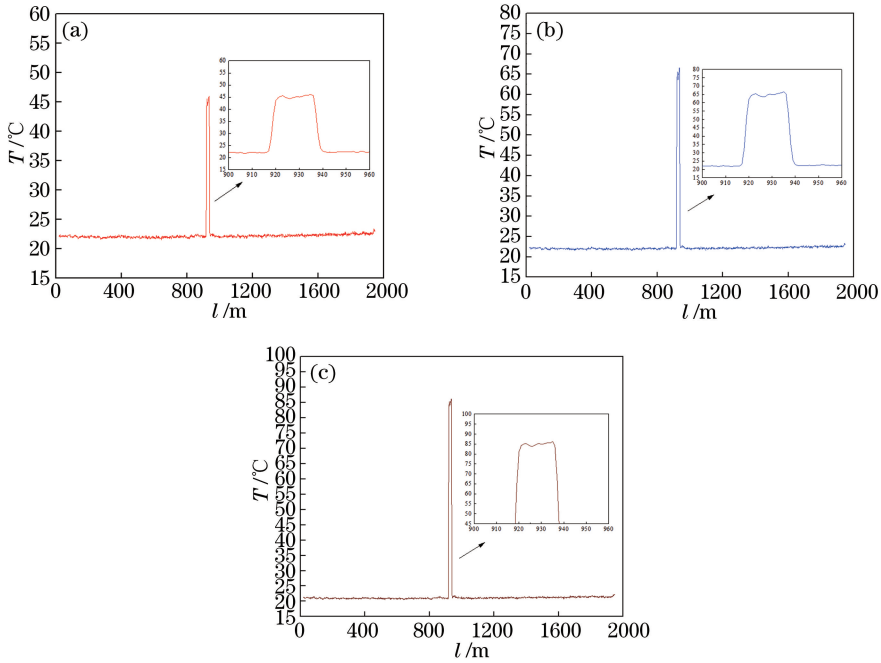


图 9 温度测量结果。(a) 45 °C ;(b) 65 °C ;(c) 85 °C

Fig. 9 Results of temperature measurement. (a) 45 °C ; (b) 65 °C ; (c) 85 °C

## 5 结 论

采用 MOPA 技术设计了一台应用于 RDTs 系统的全光纤脉冲激光器。通过理论分析和软件仿真对光路结构参数进行设计,并在实验中进一步优化,使其具有与 RDTs 系统适配度较高的性能。同时,光纤脉冲激光器具有较高的灵活度,输出光脉冲宽度以及重复频率具有较大的调节范围,输出峰值功率在 0~10 W 范围内可调,能满足 RDTs 系统使用需求。采用自制的高稳定抽运激光器驱动电路,使系统在不产生非线性的情况下能稳定地输出有较高峰值功率的脉冲。光纤激光器输出的脉冲光线宽为 0.32 nm,信噪比优于 25 dB。最后,采用 2 km RDTs 系统进行光纤分布式测温实验,实现了优于 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的测温精度以及最短可达 1.31 s 的测温周期。本研究从理论分析、Optisystem 软件仿真以及实验优化三个方面为 RDTs 系统的前级光源设计及优化提供了参考。

## 参 考 文 献

[1] Wang J F, Liu H L, Zhang S Q, *et al.* New type

distributed optical fiber temperature sensor (DTS) based on Raman scattering and its' application [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(4): 865-871.

王剑锋,刘红林,张淑琴,等.基于拉曼光谱散射的新型分布式光纤温度传感器及应用[J].光谱学与光谱分析,2013,33(4):865-871.

[2] Zhang W P, Feng J, Hu W G, *et al.* Application of distributed optical fiber temperature measurement technology in high voltage cable [J]. Optical Communication Technology, 2014, 38(7): 29-31.

张文平,冯军,胡文贵,等.分布式光纤测温技术在高压电缆中的应用[J].光通信技术,2014,38(7):29-31.

[3] Ukil A, Braendle H, Krippner P. Distributed temperature sensing: review of technology and applications [J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(5): 885-892.

[4] Fei Q, Qin J. Distributed optical fiber temperature measurement system based on Raman scattering applied to building fire monitor [J]. Fire Safety Science, 2015, 24(2): 109-113.

费芹,秦俊.基于拉曼散射的分布式光纤定温与差温探测方法[J].火灾科学,2015,24(2):109-113.

[5] Zhang M J, Li J, Liu Y, *et al.* Temperature



- demodulation method for distributed fiber Raman temperature measurement [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 0306002.
- 张明江, 李健, 刘毅, 等. 面向分布式光纤拉曼测温的新型温度解调方法[J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0306002.
- [6] Wang D, Yang Y Q, Wu W H. Process optimization for 316L stainless steel by fiber laser selective melting [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(12): 3233-3239.
- 王迪, 杨永强, 吴伟辉. 光纤激光选区熔化 316L 不锈钢工艺优化[J]. 中国激光, 2009, 36(12): 3233-3239.
- [7] Lou Q H, He B, Xue Y H, *et al.* 1.75 kW domestic Yb-doped double clad fiber laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(5): 1277.
- 楼祺洪, 何兵, 薛宇豪, 等. 1.75 kW 国产掺 Yb 双包层光纤激光器[J]. 中国激光, 2009, 36(5): 1277.
- [8] Zhang X J, Duan Y F, Zhao S, *et al.* Experimental study on high efficient all-fiber lasers at 1018 nm[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(4): 0414002.
- 张秀娟, 段云锋, 赵水, 等. 高效率 1018 nm 全光纤激光器实验研究[J]. 光学学报, 2016, 36(4): 0414002.
- [9] Jin S Z, Zhou W, Zhang Z X, *et al.* Research on application and effect of optical fiber Raman scatter [J]. Laser & Infrared, 2002, 32(5): 327-329.
- 金尚忠, 周文, 张在宣, 等. 光纤拉曼散射效应及其应用研究[J]. 激光与红外, 2002, 32(5): 327-329.
- [10] Xu G. Application and nonlinear effects in optical fiber[J]. Journal of Xi'an University of Post and Telecommunications, 2006, 11(5): 52-55.
- 许刚. 光纤中非线性效应及应用[J]. 西安邮电学院学报, 2006, 11(5): 52-55.
- [11] Giles C R, Desurvire E. Modeling erbium-doped fiber amplifiers [J]. Journal of Lightwave Technology, 1991, 9(2): 271-283.
- [12] Liu Y G, Zhang H, Meng H Y, *et al.* Two-stage erbium-doped fiber amplifier for WDM with gain flattening high gain and low noise figure [J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(10): 1196-1200.
- 刘艳格, 张昊, 蒙红云, 等. WDM 用增益平坦的高增益低噪声双段级联掺铒光纤放大器[J]. 光子学报, 2003, 32(10): 1196-1200.
- [13] Richards D H, Jackel J L, Ali M A. A theoretical investigation of dynamic all-optical automatic gain control in multichannel EDFA's and EDFA cascades [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1997, 3(4): 1027-1036.
- [14] Zhao L J, Li Y Q, Xu Z N. Theoretical analysis and calculation of the stimulated Brillouin scattering threshold in multimode fiber [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2014, 35(6): 1067-1070.
- 赵丽娟, 李永倩, 徐志钮. 多模光纤布里渊散射阈值理论分析与计算[J]. 半导体光电, 2014, 35(6): 1067-1070.
- [15] Shi K B, Sheng Q Q, Ge C F, *et al.* Studies on characteristics of erbium doped fiber amplifier [J]. Acta Scientiarum Naturalium University Nankaiensis, 1999, 32(1): 80-84.
- 施可彬, 盛秋琴, 葛春风, 等. 掺铒光纤放大器特性研究[J]. 南开大学学报(自然科学版), 1999, 32(1): 80-84.
- [16] Ma X M. Study on optimization of two-stage EDFAs [J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(6): 688-692.
- 马晓明. 两段级联掺铒光纤放大器的优化研究[J]. 光子学报, 2003, 32(6): 688-692.